

오일레스 복합계 베어링재의 최대허용 PV값 측정에 관한 실험적 고찰

공호성 · 윤의성 · 전기수* · 송광호*

한국과학기술연구원 기전연구부
*한도정밀공업(주) 개발사업부

An Experimental Analysis on the Maximum Allowable PV Value of Oilless Composite Bearing Materials

Ho-Sung Kong, Eui-Sung Yoon, Ki-Soo Chun* and Gwang-Ho Song*

Division of Mechanical/Control System, KIST

**Department of Development, Hando Precision Industries LTD*

Abstract—Maximum allowable PV values of oilless composite bearing materials (70% epoxy-resin/30% Graphite) were measured and compared at various types of test rigs that have different contact geometry and the operating conditions. Test results showed that material failure was mainly characterized by the sharp increase in both coefficient of friction and surface temperature, and different PV values were measured under different contact geometry. The discrepancy in measurement of PV values was analyzed in the light of theoretical frictional heating analysis. Results show that surface temperature rise depends on its contact geometry, and PV values could be overestimated in the testing conditions of high sliding velocity. Test data of different contact geometry were normalized by using a normalized contact pressure and sliding velocity; it showed a good correlation. This work suggests that normalized PV values could be more effective in evaluating bearing materials than conventional PV values for a design parameter of journal bearings.

1. 서 론

오일레스 베어링(oilless bearing)은 고온 및 저온, 부식성 분위기 등의 특수한 환경조건, 또는 외부로부터의 이물질의 유입이 심하거나, 충격하중 및 진동 등에 의하여 구조상 오일 급유가 불가능한 기계요소 윤활 부위에 무급유화를 실현케 하는 베어링으로서 무급유베어링, 자기윤활베어링(self-lubrication bearing) 및 오일함유베어링(oil-containing bearing) 등으로도 호칭되고 있다. 오일레스 베어링의 재질로는 금속, 플라스틱, 세라믹 등 사용 요구조건에 따라서 다양하게 사용되고 있으며, 용도에 따라서는 각 재료들의 장점들을 복합적으로 이용하기 위하여 재료들을 복수적으로 선택한 복합재료들이 이용되기도 한다[1]. 예를 들어 플라스틱 재료는 상대적으로 재료의 자기윤활성이 우수하고 상대 축의 손상을 극소화시키며 내식성 및 내화특성이 우수하고 경량으로

사용할 수 있다는 장점들을 지니고 있으나, 기계적 강도가 금속재보다는 낮고, 특히 내열성이 떨어지는 등 사용상 제한이 있는 단점을 지니고 있다. 본 연구는 에폭시(epoxy)계의 플라스틱 모재에 자기윤활 효과를 향상시키기 위하여 고체윤활제인 graphite를 중량비로 30% 첨가하여 제조한 복합계 오일레스 베어링 재질을 대상으로 하여, 상기 재료의 마찰 마모 및 윤활특성을 실험적으로 측정함에 목적이 있었다.

일반적으로 저널베어링 및 부시(bush) 등에 사용되는 오일레스 베어링의 사용 특성은 사용되는 재료의 종류에 따라서 크게 영향을 받는데, 이와 같은 사용 특성에 의해서 사용조건들이 제한받게 된다. 베어링류 기계설계에 사용되는 주요한 사용특성들에는 최대면압(P_{max}), 최대 미끄럼속도(v_{max}), 최대허용 PV값(maximum allowable PV value) 및 최대허용 온도(T_{max}) 등이 있으며, 이들 중 최대허용 PV값이 베어링의 폭등을 결정할 수 있는 중요한 설계변수이다[2]. 최대

허용 PV값 등의 특성변수 값들은 사용된 재료의 종류에 따라 일반적으로 문헌을 통하여 참조하거나, 제조사에서 시험하여 제공하는 값들을 사용하게 되는데, 사실상 최대허용 PV값이 시험측정되는 기준이 국제적으로도 표준화되어 있지 않을 뿐만 아니라, 실제적으로 사용되는 접촉운동 조건 및 윤활조건 등이 변화할 경우에 있어서는 이들 측정값의 직접적인 적용이 곤란하게 된다. 최대허용 PV값 측정기준 설정의 한 예[3]를 들면, 최대허용 PV값은 베어링 재료들의 100시간 사용시 $0.001 \text{ in}(0.025 \times 10^{-3} \text{ m})$ 의 선형마모율(linear wear rate)이 발생하는 것을 기준으로 하고 있다. 저널베어링용 플라스틱 재료의 트라이볼로지적 특성들을 평가하는 국제적인 표준방법의 한 예로서 ISO TR 8285[4] 규격을 들 수 있는데, 상기 시험 방법에서는 접촉면이 오목한(concave) block 형태의 플라스틱 시편(길이, 20 mm; 폭, 10 mm; 두께, 10 mm; 접촉면 반경, 20 mm)이 원형의 ring(외경 40 mm, ISO 683 steel) 표면과 미끄럼접촉 운동을 하는 일정한 형태의 block-on-ring 형식의 마찰마모 시험기를 사용하도록 규정하고 있다. 그러나 ISO TR 8285에 규정된 시험기를 사용하여 베어링 재료의 특성값들인 최대면압, 최대미끄럼속도 및 최대허용 PV값을 측정할 경우에 실제적으로 또 다른 문제점에 직면하게 된다. Concave한 블록시편과 구형의 링 표면과의 접촉조건 하에서 높은 시험접촉면압(p) 조건의 시험을 행하기 어려우며, 외경 40 mm인 링 표면과의 미끄럼접촉 운동 하에서 수 m/s에 달하는 고속의 미끄럼속도 조건을 쉽게 구현할 수 없기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 접촉면의 형상이 flat 형태 및 concave 형태를 갖는 플라스틱 블록시편들과 링 표면이 접촉하는 block-on-ring 시험기 및 디스크 형태의 시편표면 위로 볼이 미끄럼 접촉운동을 하는 ball-on-disk형의 마찰마모 시험기를 병행 사용함으로써 상기와 같은 문제점들을 해결하고자 하였으며, 이와 같이 각기 접촉조건이 다른 시험기 종류에 따라서 측정되는 시험 베어링재료의 마찰마모 특성변화와 이들 접촉조건 변화에 따라 최대허용 PV 측정값이 변화하는 효과에 관하여 고찰하였다.

2. 최대허용 PV 값의 이론적 배경

최대허용 PV값은 저널베어링, 부시류 등의 사용조건 한도(limit)를 결정케하는 주요한 설계인자로서, 다음과 같이 저어널의 단위투상 면적당 마찰일 혹은

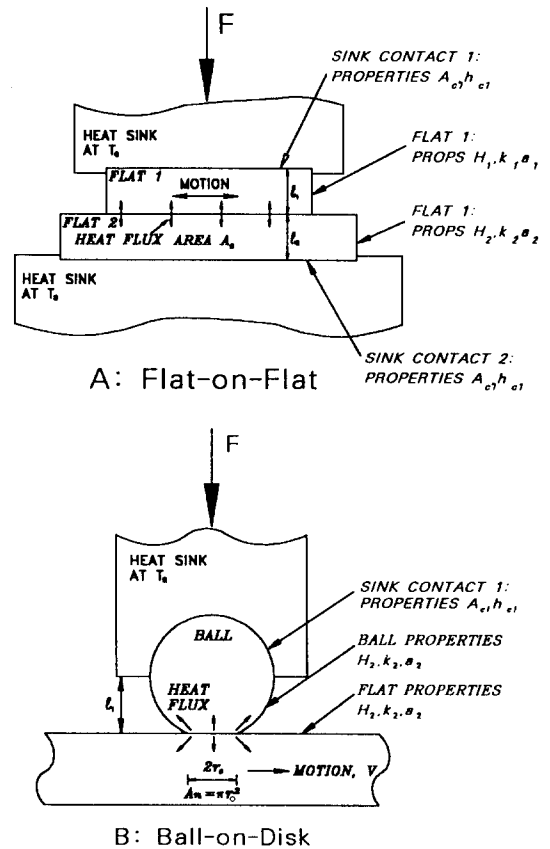


Fig. 1. Contact geometries (A: flat-on-flat, B: ball-on-disk).

마찰일과 직접적인 관련이 있다. 저어널 베어링의 경우, 반경방향의 하중을 F , 저어널의 원주속도를 v , 마찰계수를 μ 이라 하면, 단위시간의 마찰일 W 은 식 (1)과 같다 (Fig. 1 참조).

$$W = \mu F v \quad (1)$$

이 마찰일이 전부 마찰열로 발생한다고 가정하면, 마찰열 Q 는 식 (2)와 같다.

$$Q = \mu F v \quad (2)$$

이 열은 베어링 몸체로부터 열전도 등에 의하여 외부로 발산되지만, 발생열량이 발산되는 열량보다 커지면 베어링의 온도가 증가하게 되어 극심할 경우에는 높은 열에 의하여 베어링 표면의 눌러붙음(seizure) 현상이 초래될 수 있다. 발생열량을 베어링면적($l \times d$)에 비례한다고 하면, 저어널의 단위투상면적당 마찰일 W 를 제한하여야 하는데, 이 값은 식 (3)과 같다.

Table 1. Equivalent linear heat-diffusion distance with various contact geometries

Configuration	Equivalent linear heat-diffusion-distance		Equation
Flat on flat	$l_{1b} = l_1 + \frac{A_n k_1}{A_{c1} h_{c1}}$	$l_{2b} = l_2 + \frac{A_n k_2}{A_{c2} h_{c2}}$	(5)
Pin on disk	$l_{1b} = \frac{\pi^{1/2} r_o}{2} + \frac{A_n k_1}{A_{c1} h_{c1}}$	$l_{2b} = \frac{r_o}{\sqrt{\pi}} \tan^{-1} \left[\frac{0.9 \pi a_2}{r_o v} \right]^{1/2}$	(6)
Ball on disk	$l_{1b} = \frac{\pi^{1/2} r_o}{2} + \frac{A_n k_1}{A_{c1} h_{c1}}$	$l_{2b} = \frac{r_o}{\sqrt{\pi}} \tan^{-1} \left[\frac{0.9 \pi a_2}{r_o v} \right]^{1/2}$	(7)

Table 2. Physical properties of the composite materials

Physical property	Measurement	Unit	Test method
Tensile strength	3960	MPa	KSM 3006-93
Elongation	1.3	%	KSM 3006-93
Compression strength	9831	MPa	KSM 3008-88
Specific gravity	1.298	-	KSM 3016-90
Hardness	94	HRM	KSM 3037-93
Impact strength	3.6	Kgf.cm/cm ²	KSM 3055-83
Glass temperature	169.9	°C	DSC*
Softening point	152.4	°C	KSM 3065-88

*DSC: Differential scanning calorimetric measurement

$$w = \frac{W}{dl} = \frac{\mu F v}{dl} = \mu p v \quad (3)$$

마찰계수값(μ)이 일정하다고 가정하면 식 (3)에서의 PV값이 마찰열에 의한 온도상승의 주된 변수가 되며, 이를 발열계수라고 부르기도 한다[2]. 일반베어링에 있어서 PV값의 예를 보면 graphite/열경화성수지 복합계 플라스틱 베어링의 경우 약 0.35(MPa m/s), kelmet 베어링합금의 경우 약 20,000(MPa m/s) 정도로서[2,3], 플라스틱계 베어링이 금속계 베어링 재료에 비하여 상대적으로 온도 조건에 크게 취약함을 이와 같은 재료들의 최대허용PV값의 정량적인 비교로서 파악할 수 있다.

수직하중(F)을 받으며 미끄럼 운동(v)을 하는 접촉면 표면에서 마찰열 발생에 의한 온도증가(ΔT)는 Blok[5], Jaeger[6], Archard[7] 등에 의하여 제시된 수식들에 의하여 이론적으로 계산할 수 있으나, 접촉조건 변화(flat-on-flat, pin-on-disk, ball-on-disk, ball-on-three balls)를 고려하여 마찰열 발생에 의한 표면온도를 해석적으로 구한 Ashby 등[8-10]의 모

델을 이용하면 다음과 같이 보다 간단한 형태로 표시할 수 있다.

$$\Delta T = T_b - T_o = \frac{\mu F v}{A_n} \left[\frac{1}{\frac{k_1}{l_{1b}} + \frac{k_2}{l_{2b}}} \right] \quad (4)$$

T_b 는 두 물체(첨자 1, 2) 사이의 접촉면적(A_n)에서 마찰열(Fv)에 의해 발생하는 표면의 평균온도(bulk temperature)이며, T_o 는 마찰열이 전달되는 먼거리에 위치한 heat sink에서의 온도(일반적으로 대기온도로 가정), k 및 a 는 각각 물체의 열전도율(thermal conductivity) 및 열확산율(thermal diffusivity)이다. l_{1b} 및 l_{2b} 는 미끄럼 표면으로부터 각각의 두 물체를 통하여 heat sink로 마찰열이 확산되는 상당선형열확산거리(equivalent linear heat-diffusion distance)로서, Ashby 등[10]의 결과에 의하면 접촉유형에 따라 이 값들을 Table 1과 같이 나타낼 수 있다.

Table 2에서 A_c 및 h_c 는 물체와 heat sink 사이의 열접촉저항(thermal contact resistance)과 관련된 인자들로서, 각각 접촉면과 접촉전도율(contact conductivity)을 지칭한다[11]. Fig. 1은 접촉하중 F하에서 평균속도 v로 미끄럼 왕복운동을 하는 flat-on-flat 형태 및 ball-on-disk 접촉형태에서의 접촉면에서 발생하는 마찰열의 확산을 단순화하여 나타낸 모습들이다.

왕복동 미끄럼운동 형태에서의 마찰열에 의한 표면온도의 증가는 Table 1의 flat on flat 형태의 접촉유형의 경우를 적용하여, 각각의 형태에서의 접촉면(A_n)과 마찰열이 재료 내부로 확산되는 물리적인 거리(l) 및 열접촉저항계수(A_c 및 h_c) 등을 구하면, 이를 식 (4), (5)을 사용하여 이론적으로 계산할 수 있다. 상기 값들을 상수로 가정하면, 마찰열에 의한 표면의

온도증가는 식 (8)과 같으며, 따라서

$$\Delta T_{\text{Flat-on-Flat}} \propto \frac{\mu F v}{A_n} \propto pv \quad (8)$$

위의 식 (3)과 일치함을 알 수 있다.

반면에 concave 형태 및 flat 형태를 갖는 block 시편이 ring 표면과 미끄럼운동을 하는 block-on-ring 형태의 시험은 시험블록과 링 사이의 미끄럼접촉을 일정한 단면적을 지니는 편이 디스크 표면 위에서 미끄럼접촉을 하는 것으로 상상할 수 있으므로, Table 1의 접촉유형의 분류에서 pin-on-disk 형태로 간주할 수 있다. 그러나, 이와 같은 pin-on-disk 혹은 ball-on-disk 형태의 접촉 하에서의 표면온도는 PV값 증가에 의해서 선형적으로 증가하지 않는다. 표면온도 증가는 식 (6), (7)의 l_{2b} 에 의해서 좌우되는데, l_{2b} 는 식 (9)와 같이 미끄럼속도의 크기에 따라서 양극의 한계값을 보인다.

$$l_{2b} = \frac{r_o}{\sqrt{\pi}} \tan^{-1} \left[\frac{0.9\pi a_2}{r_o v} \right]^{1/2}$$

$$\text{when } \frac{0.9\pi a_2}{r_o v} \gg 1, l_{2b} \approx \frac{\sqrt{\pi}}{2} r_o$$

$$\text{when } \frac{0.9\pi a_2}{r_o v} \ll 1, l_{2b} \approx \left(\frac{0.9a_2 r_o}{v} \right)^{1/2} \quad (9)$$

따라서 pin-on-disk 및 ball-on-disk 형태의 접촉 하에서의 표면온도 증가는

$$\Delta T_{\text{Pin/(Ball)-on-Disk}} \propto pv, \text{ when } v \ll 1$$

$$\propto pv^{1/2}, \text{ when } v \gg 1 \quad (10)$$

식 (10)과 같이 표현되며, 미끄럼속도가 클 경우($v \gg 1$)에 마찰열에 의한 표면온도 상승은 더 이상 pv 와 선형적인 관계가 없음을 알 수 있다. 미끄럼속도가 큰 경우의 접촉면에서 발생하는 온도증가가 $pv^{1/2}$ 크기에 비례하는 상기의 해석적인 결과는, 사각형 및 원형의 접촉면을 갖는 미끄럼접촉 조건에서 Peclet Number가 5이상인 조건 하에서 마찰열에 의한 표면의 온도 증가를 수학적으로 계산한 Jaeger[6] 및 Archard[7]에 의한 결과와 유사하다.

3. 시험장치 및 방법

3-1. 시험 재료

본 시험에 사용된 시편들은 에폭시레진에 윤활특

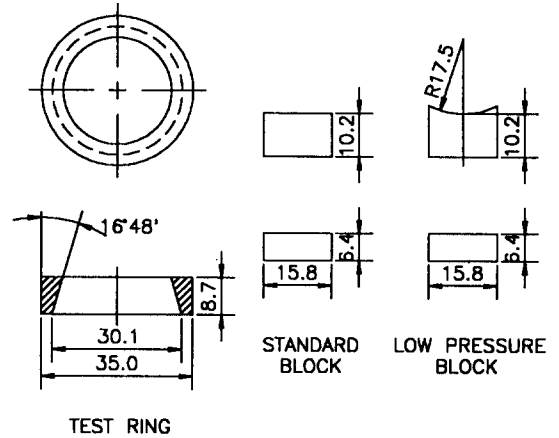


Fig. 2. Test specimens for blocks.

성을 향상시키기 위하여 고세운활제인 그라파이트분말을 혼합 중량비 70 : 30 wt% 비율로 첨가한 복합재 플라스틱 재료이다. 복합재는 진공 분위기내에서 충분히 교반하여 혼합한 후, 일정한 금형에서 성형하고, 160°C 온도의 열처리로에서 열경화하고, 냉각한 다음, 기계가공의 순서에 의한 공정으로 제조하였다. 시편의 형상은 6.4×15.8×10.2(mm) 크기의 블록 형태와 외경이 110(mm)인 원판형 형태(두께: 6 mm)로 제작하였으며, 블록 형태의 시편은 Fig. 2에서와 같이 접촉면이 오목한(concave: 반경, 17.5 mm) 형과 평평한(flat)형의 두 가지 형태를 가공하여 사용하였다.

제조된 시편의 물리적 특성은 다음 Table 2와 같이 측정되었다.

3-2. 마찰 마모시험

시험 대상인 오일레스 베어링용 복합재 플라스틱 재료의 최대 미끄럼속도 및 최대허용 PV값의 측정을 위하여 α -LFW-1 Friction and Wear Test Machine [12] (Fig. 3 참조, ASTM D2714-68)과 ball-on-disk 형태의 마찰마모시험기[13]를 병행하여 사용하였다.

Block-on-ring 접촉형태를 가지는 α -LFW-1 시험기에서 시험 링(ring)은 외경이 35.0 mm, 두께가 약 8.7 mm인 열처리된 탄소강(STPG 42)를 사용하였고, 표면경도는 960 Hv이며 표면거칠기가 0.1 μm (Ra) 정도 이었다. 시험 블록은 Fig. 2와 같이 두 종류가 시험되었으며, 무윤활 조건 하에서 마찰마모 시험을 행하였다. 상기 시험기에서 링의 회전속도는 12.5~197 rpm 범위로 5 단계의 속도변화가 가능하여 블록 표면과의 상대 미끄럼속도가 0.02~0.36 m/s 범위를

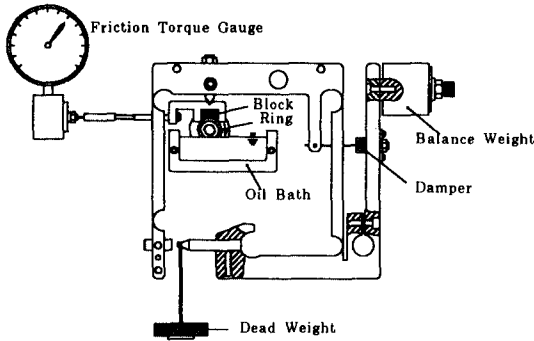


Fig. 3. Schematic view of the α -LFW-1 Friction and Wear Test Machine.

언을 수 있으나, 본 시험은 미끄럼속도가 최대인 조건 ($v=0.36$ m/s) 하에서 접촉하중을 점차로 증가시키는 방법으로 진행하였다. 접촉하중은 최대 800N 범위 내에서 시행하였으며, 시험 시간은 시험 중 재료 표면의 파괴가 발견되지 않는 한 총 4000 m로 고정하였다. 마찰력은 시험 중 일정한 주기마다 평균값을 취하여 측정하였으며, 시험 후 재료표면의 마모특성 관찰 및 마모흔, 마모량의 측정 등을 행하였다. 시험 블록의 마모량은 시험 전후의 무게변화를 기준으로 측정하였으며, 무게의 측정은 10^{-4} g 측정이 가능한 전자저울을 사용하였다. 또한 마찰마모시험시 마찰열에 의해 증가하는 접촉면에서의 온도를 간접적으로 측정하기 위하여 비접촉식 적외선 온도계(IR thermometer)를 사용하였다. 적외선 온도계는 측정거리가 54 mm이며, 측정거리 위치에서 최소 구경이 1.2 mm, 측정온도 범위 0~500°C, 측정 정도가 0.1°C 인 것을 사용하였고, 온도 측정은 시험 블록의 측면 중앙부분에서 접촉면으로부터 약 0.5 mm 정도 위로 떨어진 곳에서 적외선 측정점을 모아서 측정하였다. 재료표면의 방사율(emissivity)을 높이기 위하여 온도가 측정되는 시편 표면에 carbon paste를 덧칠하였으며, 예비시험 검증을 통하여 방사율이 0.95를 얻었다.

본 시험에 사용된 ball-on-disk 형태의 마찰마모시험기는 참고문헌[14]에 사용된 시험기와 동일한 시험기이며, 사용된 볼은 표면경도가 8.4 GPa 정도인 베이링용 재질 AISI 52100(EN 31)이다. 시험은 대기 상태의 온도(205°C) 및 상대습도(40~60%)하에서 무윤활 상태의 미끄럼운동 조건에서 행하였고, 디스크 표면의 일정한 반경(35 mm) 위에서 디스크의 회전속도를 변경하여 미끄럼속도(0~4.0 m/s)를 변화하였다. Ball-on-disk 형태의 마찰마모시험을 병행한 주된 목

적은 상기 시험기에서 시험이 가능한 고속의 미끄럼속도 조건(최고 15.0 m/s) 하에서 시험재료의 최대허용 미끄럼속도를 측정하는 목적 외에도, 접촉형태 변화에 따른 시험재료의 마찰특성 및 마찰열 발생의 변화를 관찰하기 위함이었다. 따라서 시험 조건은 첫째, block-on-ring 시험에서의 시험조건과 유사한 조건의 설정으로서, 미끄럼속도를 0.36 m/s로 고정하고 접촉하중을 4.9, 9.8, 19.6, 39.2, 58.8, 78.4N 순서의 계단식으로 증가하였다. 둘째, 하중이 각각 9.8, 19.6, 39.2N으로 고정된 조건 하에서 미끄럼속도를 0.1~4.0 m/s로 계단식으로 증가하여 변화시키면서 각 조건 하에서의 마찰력 및 온도 변화를 측정하였다. 계단식 하중 및 속도들의 단계별 증가 간격은 일정하게 시험시간 20분을 기준으로 설정하였다. 온도는 위에 언급한 IR thermometer 및 동일한 방법을 사용하여 측정하였으며, 측정부위는 볼 표면의 측면에서 접촉면으로부터 수직방향으로 약 1.0 mm 위로 떨어진 곳에 적외선의 측정점을 모아서 측정하였다. 각각의 시험조건 하에서 측정된 마찰력 및 온도들은 12 bit A/D 변환기를 통하여 PC에 입력되었다. 시험 조건 하에서의 접촉압력은 시험종료 후를 기준으로 하여 볼 표면 위에서 발생된 마모흔의 크기를 측정하여 평균적으로 계산되었다.

4. 시험 결과

4-1. Block-on-ring형 마찰마모시험 결과

Fig. 4 및 Fig. 5은 접촉면의 형상이 오목한 시편과 편평한 블록 시편을 이용한 block-on-ring형 마찰마모시험에서 측정된 하중변화에 따른 마모율 및 마찰계수의 변화를 나타내고 있다. 각 조건에서의 시험은 결과의 재현성을 위하여 최소 3번 이상의 측정결과를 평균한 결과이며, 마찰계수 결과는 총 4000m의 시험시간에서 안정화된 값을 기준으로 측정된 것이다.

Fig. 4의 마모율의 변화를 보면, 링 표면과 선접촉(line contact)을 하는 편평한 형태의 시험블록들에서의 마모율이 전체면적($A_n=1.03$ cm²)에 걸쳐 낮은 면압을 받는 오목한 블록 시편들에서보다 높은 접촉압력(p)을 받으므로 상대적으로 크게 측정되었으나, 667 N의 높은 하중 하에서는 오목한 형태의 블록 시편들에서의 마모율이 더 높게 발생하였다. 667N 하중 조건에서 오목한 형태의 블록시편 표면에서는 시험 후에 접촉면 전반에 걸쳐 Fig. 6과 같이 파손되는 모습이 관찰되었는데, 접촉면에서 발생한 높은 마찰열에

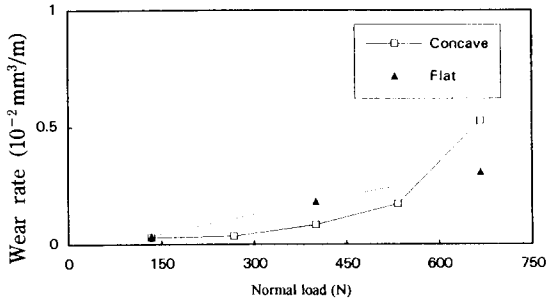


Fig. 4. Wear rates of the test specimens.

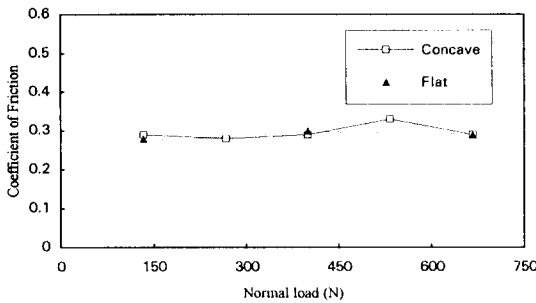


Fig. 5. Coefficients of friction of the test specimens.

의하여 재료표면의 온도가(최고 190°C) 상승하여 극심한 소성변형을 야기시키며, 동시에 높은 마찰계수(약 0.5)를 수반하며 표면이 심하게 찢겨나가는(tearing) 모습들이 나타나고 있다. Fig.7은 상기 조건 하에서 마찰열에 의한 온도상승 및 마찰계수들을 측정 한 결과의 예이다. 시험 초기(~500m) 구간에서 온도 및 마찰계수들이 급격하게 증가하였다가 다시 감소하여 안정화되었는데, 이는 마찰열에 의한 접촉면의 온도가 시험재료의 glass temperature(170°C)/하중연화온도(152.4°C, Table 2참조) 이상으로 상승되면서 국부적으로 소성변형되어 접촉부의 전단저항력이 낮아지고, 마찰계수가 감소함으로써, 결과적으로 마찰열이 감소되어 평형점을 찾는 현상의 결과인 것으로 사료된다. 이러한 측정결과는 높은 PV값의 운동조건 하에서 폴리머 및 고무 재료들의 마찰열에 의한 표면온도 상한 값('Friction defined temperature')이 존재한다고 주장한 Ettles 등[15]의 결과와 일치한다.

반면에 이와 동일한 접촉하중 조건 하에서 flat 형태의 시험블록에서의 온도는 약 80°C 정도로 안정화되는 측정결과를 나타냈으며, 마찰계수도 별다른 변동없이 약 0.3정도로 측정되었다. 그러나, 접촉하중을

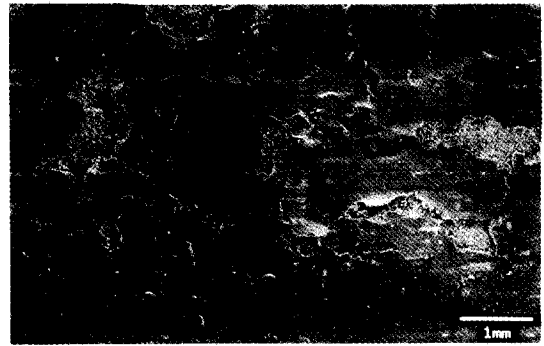
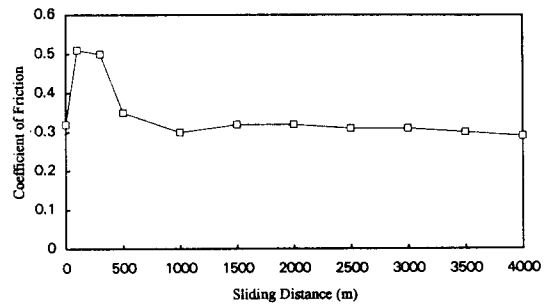
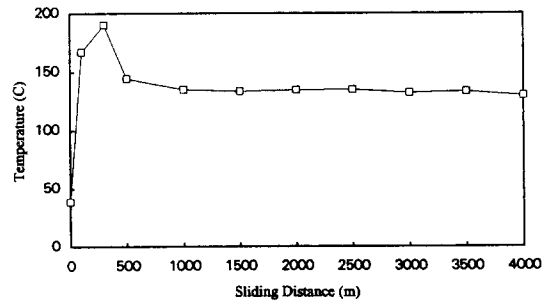


Fig. 6. A micrograph showing surface damage under a normal load of 667N at a concave type of block-on-ring test (note that surface is fractured by tearing). Direction of sliding is from left to right hand side.



(a) Coefficients of friction



(b) surface temperature

Fig. 7. (a) Coefficients of friction and (b) surface temperature measured under the normal load of 667 N at a concave type of block-on-ring test.

800N 이상으로 증가시켜 시험한 결과에서는 재료표면이 시험 초기에(약 20m 미끄럼거리) Fig.6과 유사한 모습을 보이며 급격하게 파손되어 시험을 중단하여야 하였다. 재료의 파손이 발견될 때의 블록에서의 마찰온도는 최고로 약 150°C 이상이 측정되었으며,

Table 3. Conforming contact pressures at both flat and concave type of the test blocks

Load (N)	Conforming contact pressure (p, MPa)	
	Flat type	Concave type
133	18.5	1.3
400	32.3	3.9
667	45.7	6.5
800	3.4(initial fracture)	7.8

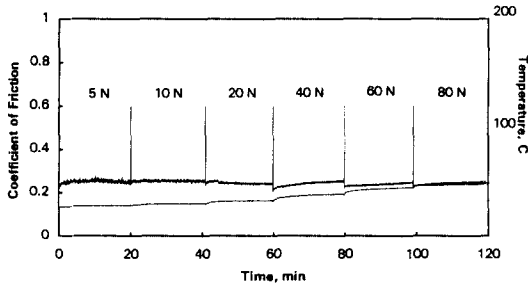


Fig. 8. Change in coefficient of friction and temperature under increasing load ($v=0.36$ m/s) at ball-on-disk test; the applied load was increased in step from 5N to 80N.

온도증가와 함께 마모흔의 면적이 급격하게 증가하는 모습이 관찰되었다. Table 3은 flat 형태의 블록 시편들의 표면에 발생된 마모흔의 면적을 시험 후에 측정하여 평균접촉면압의 크기를 계산한 결과로서, 같은 시험하중 하에서의 concave 형상의 블록시편들에서의 평균접촉면압과 비교한 결과이다.

4-2. Ball-on-disk형 마찰마모시험 결과

Fig. 8은 미끄럼속도 0.34 m/s 하에서 접촉하중을 4.9, 9.8, 19.6, 39.2, 58.8, 78.4N 순서의 계단식으로 증가시킨 시험조건 하에서의 마찰계수 및 온도의 변화를 측정한 시험결과들로서, 대표적인 한 예를 나타내고 있다. 상기 시험조건 하에서 측정된 마찰계수는 약 0.28 정도로 block-on-ring 시험에서 보다 다소 낮았고 표면온도의 최고값이 약 60℃ 미만으로 측정되었으며, 시험 조건 하에서 재료표면이 마찰열에 의하여 극심하게 파손되는 현상도 발견할 수 없었다. 시험 후에 불표면 접촉부의 굽힌 자국을 측정된 원형 마모흔의 평균면적은 $2.18 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 으로, 시험 종료시 평균접촉압력이 약 36 MPa 정도로 계산되었으며, flat 형태의 블록 시편에서의 면압과 유사하였다.

Fig. 9는 하중이 각각 9.8, 19.6, 39.2N으로 고정된

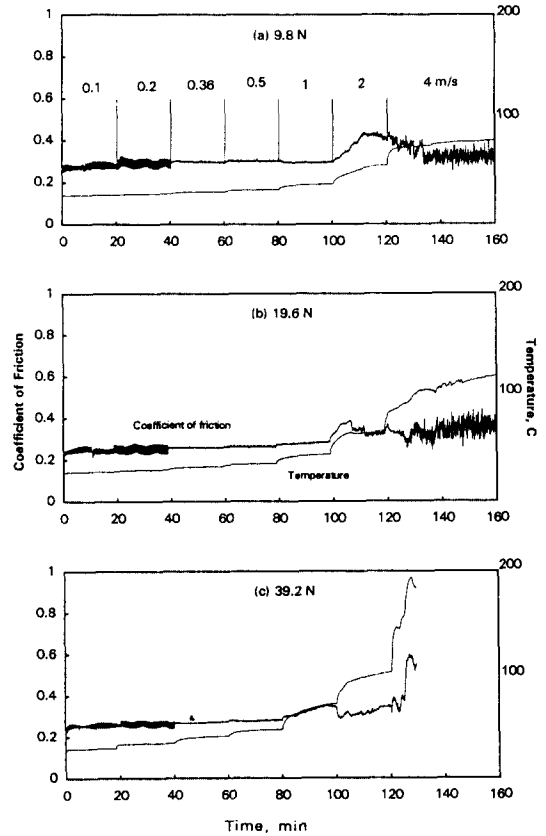


Fig. 9. Change in both coefficient of friction and surface temperature with the sliding velocity (under the normal load of (a) 9.8N, (b) 19.6N, (c) 39.2N).

조건 하에서 미끄럼속도를 0.1~4.0 m/s 범위에서 계단식으로 증가하여 변화시키면서 각 조건 하에서의 마찰 및 온도 변화를 측정한 결과이다. 저속 조건 하에서의 마찰계수 및 온도는 하중 및 미끄럼속도 증가에도 불구하고 거의 일정한 측정값을 보였으나, 미끄럼속도가 약 1.0 m/s 이후의 조건에서는 마찰계수 및 온도가 급격하게 증가하는 결과를 보이고 있다. 특히 pv 크기가 상대적으로 높았던 하중 39.2N 하에서의 결과는 미끄럼속도 4.0 m/s 조건에서 높은 마찰계수(>0.5) 및 마찰온도(>최고 190℃)가 측정되었는데, 마모트랙 위의 접촉면이 검게 탄화되는 모습이 관찰되었다. Fig. 9(c)의 하중 39.2N인 경우에, 시험 후에 불표면 위의 굽힌 자국으로 나타난 타원형의 면적을 측정하여 시험 종료시의 평균적인 접촉압력을 구한 결과 4.6 MPa 정도로 계산되었다. Fig. 9(c)에서의 접촉면압이 Fig. 8 시험의 36 MPa에 비하여

낮게 측정된 결과는 상대적으로 미끄럼거리(4992m)가 길어서 마모흔의 면적이 증가한 시험조건 차이점 외에도, 높은 마찰열 발생으로 인한 표면온도 증가에 의해서 접촉트랙 위의 표면이 연화되어 소성변형되므로써 접촉면적이 증가한 결과로 사료된다. Fig. 10은 ball-on-disk형 시험조건하에서의 접촉면의 마찰온도를 Ashby 등[8-10]에 의해 개발된 소프트웨어 'T-MAPS4'를 이용하여 이론적으로 계산한 결과이다. 그림에 나타난 점선은 국부돌기 접촉면에서의 flash temperature를, 실선은 접촉면의 평균온도인 bulk temperature의 등온선 지도를 나타내고 있다. 각 등온선은 좌측으로부터 각각 50, 100, 150, 200°C의 온도를 나타낸다. 시험재료의 열적물성값은 참고문헌 [16]을 인용하여 사용하였으며, 마찰계수(0.3) 및 시험재료의 기계적물성(Table 2참조) 등은 시험측정결과들을 사용하였다. 볼의 접촉면적은 Fig. 8의 시험후의 측정결과인 $r_0=0.8$ mm를 기준하여 사용하였다. 그림에 표시된 숫자 '1'은 Fig. 8의 시험결과 중 하중 78.4N($p=36.7$ MPa), 미끄럼속도 0.36 m/s의 시험조건을 지도상에 표시한 것으로 접촉면의 평균마찰온도가 약 150°C 정도임을 보이고 있다. 숫자 '2'는 미끄럼속도 4.0 m/s, 접촉하중은 39.2N($p=18.0$ MPa) 하에서의 조건을 표시한 것으로, 상기조건하에서의 마찰온도가 200°C를 상회하는 것을 나타내고 있는데, Fig. 9(c)의 마찰온도 측정결과와 매우 근접되어 계산된 결과를 나타내고 있다.

5. 고 찰

접촉면의 형상이 flat 형태 및 concave 형태를 갖는 블록시편과 링 표면이 접촉하는 block-on-ring형 시험기 및 ball-on-disk형의 마찰마모 시험기를 사용하여, 저널베어링용 재료로서의 마찰마모 특성을 측정할 결과, 시험대상인 플라스틱계 복합재의 사용최대면압(p_{max})은 미끄럼속도 0.36 m/s하에서 약 45.7 MPa이며, 사용최대 미끄럼속도(v_{max})는 약 1.0 m/s이었다. 이 때 사용 최고허용 조건은 접촉면의 파손이 발견되거나, 혹은 높은 마찰계수(0.4 이상) 및 마찰온도(약 150°C) 등이 발생하는 현상을 재료파손의 기준으로 하여 상기 시험조건에 의한 값을 선정하였다. 시험재료의 최대허용 PV값은 접촉유형이 다른 시험기 종류에 따라서 각각 다르게 측정되었는데, Table 4과 같이 측정결과를 요약할 수 있다.

Table 4에서 r_0 는 각 시험조건에서의 접촉면적을

원형으로 가정하여, 이에 상응하는 접촉면적의 반경(equivalent contact radius)을 참고로 산출하여 나타낸 것이다. 최대허용PV값의 측정 결과가 접촉유형에 따라 다르게 측정된 주된 이유는 각 접촉유형별로 접촉면에서 발생하는 마찰열의 확산 특성이 다르기 때문이다. 상대적으로 미끄럼운동을 하는 두 물체 사이에서, 순간적으로 움직이는 마찰에너지 열원(moving frictional heat source)에 의하여 발생하는 마찰열의 확산 특성에 영향을 미치는 인자들로는 미끄럼속도, 접촉면의 형상, 마찰열이 확산되는 재료들의 열적/기계적 물성 및 형상, 접촉면에서의 열저항(heat resistance) 등을 열거할 수 있다. 특히 주어진 접촉조건 하에서의 마찰열의 확산특성은 미끄럼속도와 재료 내부로의 열확산속도의 비(pecllet number)에 의해서 크게 영향을 받는데, 이 비가 커지면(>5) 재료 내부로 열확산되는 깊이는 매우 작아지게 되며, 열확산의 형태도 접촉면에 대하여 거의 선형적으로 이루어진다고 할 수 있다[17,18]. 따라서 마찰열에 의한 표면 내부에서의 온도증가는, 미끄럼속도 증가의 단일 요인보다는 접촉면의 기하학적 크기와 관련이 있는 재료 내부로의 열확산속도와 밀접한 관계가 있다.

열확산속도를 고려하여 다음과 같이(Fig. 10참조) 정규화(normalized)된 미끄럼속도(\tilde{v}) 및 접촉하중(F)의 변수를 각각 도입하면 접촉 조건이 상이한 두 물체 사이에서의 마찰열에 의한 표면온도증가(ΔT)를 다음과 같이 구할 수 있다. 즉,

$$\tilde{F} = \frac{F}{A_n H_0}$$

$$\tilde{v} = \frac{v r_0}{a_{eff}}$$

$$\text{where } r_0 = \sqrt{\frac{A_n}{\pi}}, \quad a_{eff} = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (11)$$

식 (11)에서 미끄럼속도(\tilde{v})는 접촉면에서의 상대 미끄럼속도를 열확산속도로 나눈 형태인 정규화된 미끄럼속도를 나타낸다. 이 때 정규화된 표면온도의 증가는 식 (12)와 같이 표시된다.

$$\Delta T = \frac{\mu \tilde{F} \tilde{v} \tilde{T}^*}{k_{eff} \left(\frac{r_0}{l_{1b}} + \frac{k_2}{l_{2b}} \right)} = \beta \mu \tilde{F} \tilde{v} \tilde{T}^*$$

$$\text{where } T^* = \frac{a_{eff} H_0}{k_{eff}}, \quad k_{eff} = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (12)$$

Table 4. Maximum allowable PV values with various types of contact configuration

Contact configuration	p (MPa)	v (m/s)	pv _{max} (MPa·m/s)	r _o (m)
Concave block-on-ring	>6.5	0.36	>2.3	5.7×10 ⁻³
Flat block-on-ring	45.7	0.36	16.5	2.1×10 ⁻³
Ball-on-disk	18.0	2.0	36.0	0.8×10 ⁻³

Table 5. Normalized maximum allowable PV values with various types of contact configuration

Contact configuration	\tilde{F}	\tilde{v}	$\tilde{F}\tilde{v}_{max}$	pv _{max} (MPa·m/s)
Concave block-on-ring	>9.4×10 ⁻³	540	>5.1	>2.3
Flat block-on-ring	66.2×10 ⁻³	199	13.2	16.5
Ball-on-disk	26.1×10 ⁻³	421	11.0	36.0

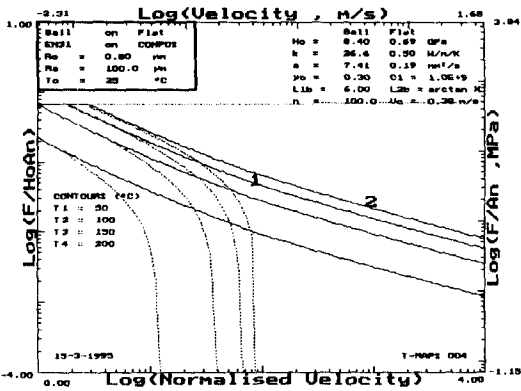


Fig. 10. A temperature map for the sliding EN31 ball on test material (full line: bulk temperature, broken line: flash temperature). The conditions at marks are; '1' at 0.36 m/s, '2' at 4.0 m/s. Contact pressures are those at the end of the test.

식 (12)의 표면온도에서 β 는 두 물체의 접촉유형 및 마찰열 확산특성 변화에 따르는 상수이며, H_o 은 접촉하는 두 물체 중 연한재료의 상온에서의 경도를 표시한다. 식 (11)과 (12)에 의하여 Table 4을 다시 계산하면 Table 5와 같이 구할 수 있다.

Table 5의 정규화된 $\tilde{F}\tilde{v}_{max}$ 의 결과는 Table 4의 pv_{max} 결과 값들에 비하여 접촉유형의 변화에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Table 4에서 구한 최대허용 PV값들의 변화가 접촉유형에 따라서 최대 15배의 차이를 보이는 반면에, 정규화된 $\tilde{F}\tilde{v}_{max}$ 의 결과에서는 약 2.5배의 이내로 근접된 계산값들을 나타내고 있다. 접촉조건이 다른 조건에서의 정규화된 $\tilde{F}\tilde{v}_{max}$ 의 결과의 차이는 접촉면압의 산출, 시험조건 단계별 설정 등의 시험 및 측정 등에 의한 오차 등에

의한 부수적인 결과로서 간주할 수도 있으나, 다음과 같이 주요한 원인들을 지적할 수 있다. 첫째, 접촉조건 변화에 따라 각 시험에서의 마찰면의 기하학적 형상이 다르다. 미끄럼방향으로의 접촉면의 길이(L)와 이와 수직방향의 폭(B)의 측정결과를 보면 접촉면이 오목한 블록의 경우 L/B의 비가 약 2.5/1인데 비하여, flat한 블록시편의 경우 하중 667N 시험 후의 접촉면의 형상은 L/B의 비가 약 1/2.8이었다. Jaeger[6]는 이론적인 계산결과를 통하여, 접촉면적이 서로 같은 조건 하에서도 이러한 접촉면의 기하학적 형상의 차이에 의하여 발생하는 표면온도가 약 2배이상 달라짐을 보였다. L/B의 비가 1/1일 경우의 온도가 가장 높으며 상기의 비가 커지거나 작아질수록 마찰온도는 낮아 지는데, 특히 L/B가 작아질수록 발생하는 온도는 상대적으로 낮아진다. 둘째, ball-on-disk형의 마찰마모 시험결과에서 최대허용 PV값 결과에 적용된 미끄럼 속도는 block-on-ring 시험에 비하여 상대적으로 높은 속도 범위이므로, 발생된 마찰온도는 식 (10)에서 나타낸 바와 같이 미끄럼속도 v보다 v^{1/2} 크기에 비례할 수 있다. 따라서 미끄럼속도 v를 기준으로 한 $\tilde{F}\tilde{v}$ 에 의해서 산출된 값이 과장되어 크게 계산될 수 있다. 따라서 이상의 원인 요소들이 식 (12)의 마찰온도 계산에 적용되면 접촉조건 변화를 감안한 마찰온도의 계산과 이에 의한 최대허용 PV값의 측정이 보다 정확하게 계산될 수 있을 것이다.

6. 결 론

에폭시-그라파이트계 오일레스 복합계 베어링재의 최대허용 면압, 미끄럼속도 및 최대허용PV값을 측정하기 위하여 작동조건 및 미끄럼 접촉형태가 각기

다른 block-on-ring 및 ball-on-disk 마찰마모시험기를 사용하여 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 에폭시-그라파이트계 오일레스 복합계 베어링재의 파손은, 높은 면압과 미끄럼속도에 의해서 발생되는 높은 마찰열에 의한 온도상승에 따라 극심한 소성변형과 높은 마찰계수를 수반하며, 표면이 벗겨나가는 tearing 현상으로 발생한다.
2. Block-on-ring 및 ball-on-disk 식의 접촉형태를 가지는 시험에서 미끄럼 마찰운동에 의하여 발생하는 접촉면에서의 온도상승은 저속의 미끄럼속도 하에서는 pv의 크기에 비례하나, 고속의 미끄럼속도 하에서는 $pv^{1/2}$ 의 크기에 비례한다.
3. 접촉면적 및 형태가 서로 다른 접촉조건 하에서 두 물체의 접촉면에서 발생하는 표면온도의 증가는 각 조건에서의 마찰열 확산 차이에 의하여 접촉면압 크기에 미끄럼속도를 곱한 상대적인 크기에 의해서 단순하게 비교할 수 없으나, 접촉면압을 표면의 경도로서 미끄럼속도를 마찰열의 확산속도로서 각각 정규화한 $\tilde{F}\tilde{v}$ 의 상대적인 크기로서 비교할 수 있다.
4. 저널베어링 및 부시류 재료 등의 설계변수기준으로서 사용되고 있는 PV값은, 시험측정 시의 접촉 조건 변화를 고려하여 접촉면압을 표면의 경도로서, 미끄럼속도를 마찰열의 확산속도로서 각각 정규화하여, 상기 값을 정규화된 PV값(normalized PV value) 형태로써 사용하는 것이 더욱 효과적이다.

참 고 문 헌

1. K. Friedrich, Friction and wear of polymer composites, Elsevier, 1986.
2. 박영조, 기계설계, 제 7장, pp.237, 보성문화사, 1981.
3. M. J. Neale, Tribology Handbook, Part C1: Plain Bearing Materials, Newnes Butterworths, London, 1973.
4. ISO TR 8285, Plain bearings-evaluation of the tribological properties of polymer-based materials, 1990.
5. H. Blok, "The flash temperature concept", Wear, Vol. 6, pp. 483-494, 1963.
6. J. C. Jaeger, "Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts", *J. and Proc. Roy. Soc.*, **76**, pp. 203-224, 1943.
7. J. F. Archard, "The temperature of rubbing surfaces", *Wear*, **2**, pp. 438-455, 1958/59.
8. M. F. Ashby, J. Abulawi and H. Kong, "Temperature maps for frictional heating in dry sliding", *STLE Tribology Trans.*, **34**(4), pp. 577-587, 1991.
9. H. Kong and M. F. Ashby, "Wear mechanisms in brittle solids", *Acta Metall. Mater.*, **40**(11), pp. 2907-2920, 1992.
10. M. F. Ashby, H. Kong and J. Abulawi, "T-MAPS (version 4.0)", User Manual and Background Reading, Engineering Dept., Cambridge Univ., U.K., 1991.
11. J. P. Holman, Heat transfer, International Student Edition, Chapter 2, pp. 45-47, 1976.
12. ASTM Test Method, D2714-68, Calibration and Operation of the Alpha Model (LFW-1 Friction and Wear Testing Machine, 1978.
13. 공호성 외, "진공 및 특수 환경 분위기에서 사용하기 위한 마찰 및 마모시험 장치", 대한민국 특허, 출원번호 제 94-10027호, 1994.
14. 공호성, 윤의성, 권오관, "진공 분위기 내에서 건조 마찰 미끄럼운동을 하는 저탄소강 표면의 마찰마모 특성", 한국윤활학회지, 제 10권, 제 3호, pp. 29-38, 1994.
15. C. M. Ettles and C. E. Hardie, "The friction of some polymers and elastomers at high values of pressure x velocity", *Journal of Tribology*, **100**, pp. 678-684, 1988.
16. S. C. Smithells, Metals Reference Book, 4th edition, Butterworths, London, 1967.
17. H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, Conduction of heat in solids, Oxford Clarendon Press, 1988.
18. K. L. Johnson, Contact Mechanics, Chapter 12, pp. 374-380, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.